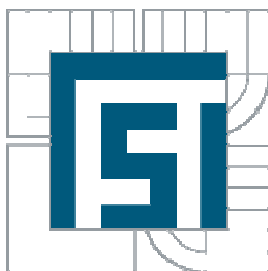




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

MODERNÍ TRENDY VYUŽITÍ KERAMICKÝCH JADER PRO LETECKÝ A ENERGETICKÝ PRŮMYSL

MODERN TRENDS OF USING CERAMIC CORES FOR AEROSPACE AND IGT SECTOR

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

PAVEL KARAFA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

ING. LADISLAV TOMEK

BRNO 2014

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Pavel Karafa

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Moderní trendy využití keramických jader pro letecký a energetický průmysl

v anglickém jazyce:

Modern trends of using ceramic cores for aerospace and IGT sector

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílovým průmyslovým oborem, kam je zaměřen předmět této práce, je odlévání vysoce jakostních odlitků pro letecký, energetický a automobilní průmysl. Zejména v posledních letech společnosti, které se zabývají výrobou vysoce složitých a sofistikovaných odlitků, zvyšují tlak na dodavatele, a roste poptávka po produktech, které by umožnily výrobu kvalitnějších a komplexnějších tvarů. Nedílnou součástí výroby takových odlitků je kvalitní keramické jádro, které umožňuje vyrábět odlitky s tvarově složitou dutinou. Míra složitosti vnitřní dutiny je určována právě keramickým jádrem. Pro složitější jádra při odlévání hliníkových slitin se v poslední době začínají vyvíjet jádra na „nekeramické“ bázi, která jsou pojena pojivy rozpustitelnými ve vodě.

Cíle bakalářské práce:

Zmapování nejmodernějších metod výroby keramických jader a popis aplikací ve zmíněných průmyslových odvětvích.

Seznam odborné literatury:

1. SINGH, N.-P., NEUBAUER, J. N. What Every Commercial, Aerospace, IGT Investment Caster Needs to Know about Ceramic Cores. Incast. 2003, vol. 26, no. 4, p.18-21. ISSN 1045-5779.
2. HOLEČEK, S., PRAŽÁK, M. Možnost výroby vodou rozrušitelných jader pro hliníkové slitiny. Slévárenství. 1999, roč. 43, č. 4, s. 227-229. ISSN 0037-6825.
3. BEELEY, P.-R., SMART, R.-F. Investment Casting. Cambridge: The University Press, 1995. 486 p. ISBN 0 901716 66 9.
4. CAMPBELL, J. Castings. Oxford: Butterworth – Heinemann, 1991. 288 p. ISBN 0 7506 1072.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Ladislav Tomek

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/2014.

V Brně, dne 21.11.2013

L.S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan fakulty

Abstrakt

Bakalářská práce pojednává o výrobním procesu a aplikacích keramických jader pro použití ve slévárnách přesného lití. Tato keramická jádra nalézají použití ve velké míře v leteckém a energetickém průmyslu pro výrobu lopatek turbín, či někdy také pro vytvoření dutin u odlitků, jež nelze jinými metodami vytvořit. Samostatná úloha keramických jader popisovaných v práci spočívá ve vytvoření chladících kanálků uvnitř těla lopatky pro zdokonalení pracovního chodu turbíny. Práce v úvodu stručně popisuje odlévání pomocí metody vytavitelného modelu, kterou se lopatky turbín vyrábějí, posléze materiály, samostatný proces výroby keramických jader, jejich odstranění z odlitku a výchozí aplikaci jader.

Klíčová slova

Keramické jádro, chladící kanálky, lopatky turbín, metoda vytavitelného modelu, fused silica.

Abstract

The bachelor thesis deals with the manufacturing process and applications of ceramic cores for use in investment casting foundries. These ceramic cores find use extensively in the aerospace and energy industries for the production of turbine blades, or sometimes to create cavities in castings, which can't be created by other methods. A separate task of ceramic cores described in the work is to create cooling cavities inside the body of the blade to improve the working process of the turbine. Work on the introduction briefly describes the casting using the lost wax method, which the turbine blades are produced, then the materials, separate process for producing ceramic cores, removing them from casting and default application of kernels.

Key words

Ceramic core, cooling passageways, turbine blades, investment casting, fused silica.

Bibliografická citace

KARAFKA, P. *Moderní trendy využití keramických jader pro letecký a energetický průmysl*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 35 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Ladislav Tomek

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Moderní trendy využití keramických jader pro letecký a energetický průmysl vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů uvedených na seznamu v závěru této práce.

Datum:

Jméno a příjmení:.....

Poděkování

Děkuji tímto panu Ing. Ladislavu Tomkovi za cenné připomínky a rady při vypracovávání bakalářské práce.

Obsah

| | |
|---|----|
| Slévárenská jádra-úvod | 9 |
| 1. Metoda přesného lití pomocí vytavitelného modelu | 10 |
| 2. Keramická jádra - materiály | 11 |
| 3. Vlastnosti a druhy pojiv | 15 |
| 4. Výroba keramických jader | 16 |
| 4.1 Příprava směsi | 17 |
| 4.2 Vstřikování směsi | 18 |
| 4.3 Stroje pro injektáž keramických jader | 19 |
| 4.4 Úprava polotovaru a vytvrzování jader | 20 |
| 4.5 Vypalování jader | 21 |
| 4.6 Úprava jader po vypálení | 21 |
| 5. Použití jader | 22 |
| 6. Odstranění jader z odlitků | 24 |
| 7. Chyby jader a jejich deformace | 25 |
| 8. Výchozí použití keramických jader | 27 |
| 8.1 Plynové turbíny | 27 |
| 8.2 Další možné výchozí aplikace keramických jader | 29 |
| 9. Závěr | 31 |

Slévárenská jádra-úvod

Průmyslový obor s bohatou historií na území České republiky, slévárenství, patří dnes mezi velice důmyslné odvětví, umožňující výrobu tvarově rozmanitých a jinak složitých součástí. Konečný tvar součásti a její potřebné vlastnosti udává volba dané technologie výroby. Pro výrobu odlitků, ať už hliníkových či ocelových, u kterých je potřeba vnitřních dutin, nebo jsou tvarově velice komplikované a výroba modelu by byla značně složitá, se využívají tzv. jádra.

Keramická jádra využívaná ve slévárenství jsou části forem, jež nejsou vyplněna taveninou. Ve výrobě odlitků se využívají jádra pravá, tj. celé jádro je obklopeno taveninou, a jádra nepravá, která se používají při velmi složitém tvaru dutiny ve formě. Jádra musí být odolné vůči externím vlivům při výrobě, expedici, transportu a v neposlední řadě při vkládání do forem, tudíž jejich mechanické vlastnosti závisí na pevnosti materiálu, a také při samostatném vypalování jader, žáruvzdornosti. Zde vynikají materiály na bázi keramiky, které jsou pro použití u daných částí forem nejvhodnější.

Tato rešerše se zabývá výrobou, vlastnostmi a využitím keramických jader pro letecký a energetický průmysl. Mezi další součásti, ve kterých jsou při výrobě použita keramická jádra, jsou oběžná kola čerpadel, těla ventilů, komponenty pro přípravu vstřikovacích směsí či komponenty golfových holí.



Obr. 1 Jádro pro systém chlazení lopatek parní turbíny [1]

Zde se velmi dobře uplatňuje metoda přesného lití s vytavitelným modelem a využití keramického jádra.



Obr. 2 Jádra pro oběžná kola čerpadel [2]

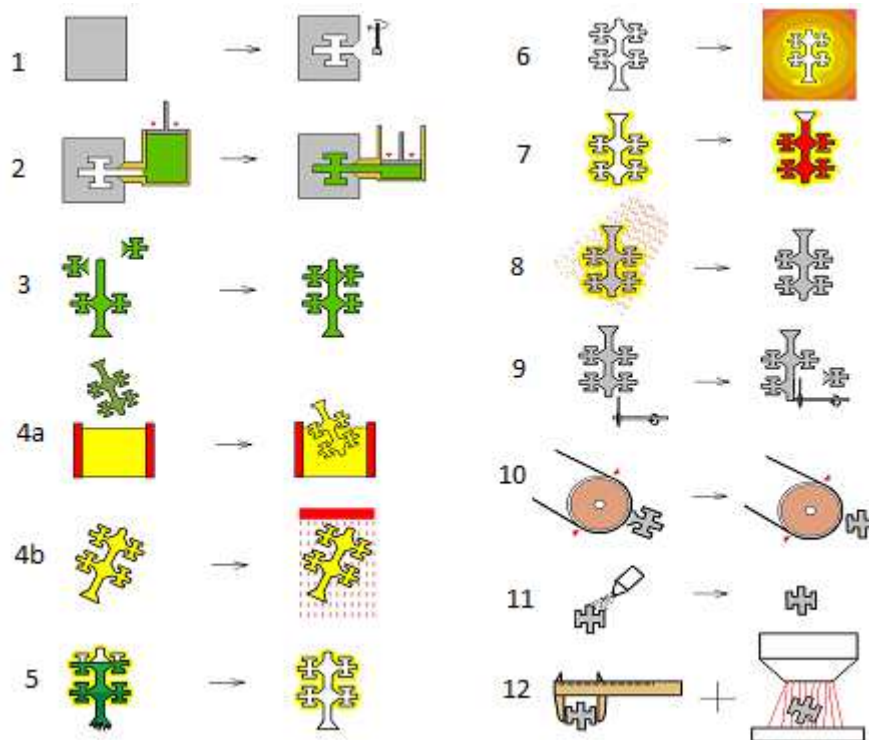
1. Metoda přesného lití pomocí vytavitelného modelu

Metoda lití pomocí vytavitelného modelu, neboli také “lost wax” či “investment casting”, zastává klíčovou pozici mezi moderními technologiemi lití kovů. Je to jedna z nejnáročnějších a nejsložitějších technologií a dovoluje vyrábět velice přesné odlitky s tak dobrou jakostí povrchu, že ve většině případů nejsou nutné další dokončující operace. Z těchto důvodů ji lze zařadit mezi technologie “near net shape” (produkty blízké hotovým výrobkům). Díky tomu se dají použít i materiály, které nelze jinými ekonomicky výhodnými technologiemi zpracovávat, nebo je jejich výroba nemožná.

Při výrobě součástí se v dnešní době prosazují stále vyšší požadavky na jakost, kvalitu povrchu, rozměrovou přesnost, vnitřní čistotu, vyšší funkční parametry, a to vše při velkém ovlivnění skrze výrobní náklady. Lití metodou vytavitelného modelu s keramickým jádrem je pro tento technologický postup vhodný.

Princip je následující:

- 1) Výroba forem na modely
- 2) Výroba voskových modelů – vstřikováním roztaveného vosku do formy
- 3) Sestavování modelů do stromečků
- 4a,b) Výroba skořepin – namáčení voskových modelů do keramické břečky, posypávání voskových modelů žáruvzdorným materiálem
- 5) Vytavování voskových modelů
- 6) Vypalování skořepin
- 7) Tavení a odlévání
- 8) Odstraňování keramiky
- 9) Oddělování odlitků z vtokové soustavy - řezání
- 10) Oddělování vtoků z odlitků – broušení
- 11) Dokončovací operace – tryskání, broušení, leštění
- 12) Kontrola



Obr. 3 Princip metody vytavitelného modelu [3]

2. Keramická jádra - materiály

Keramická jádra se používají pro velmi sofistikované výrobky, proto si slévárny samy určují požadavky na hotový výrobek a materiály musí splňovat přísná kritéria, jak pro výrobu forem, tak pro samostatná jádra.

Jedná se především o následující vlastnosti:

Žáruvzdornost

Díky nízkému koeficientu tepelné roztažnosti keramiky, která se pohybuje ve většině druhů žáruvzdorné keramiky pod hodnotou 2%, ji lze použít s vysokými rozdíly teplot (v rozmezí od 700 - 1700°C) v kontaktu s taveninou při odlévání. To vše bez narušení střepu.

Pevnost

Keramické materiály mají dobré mechanicko-fyzikální vlastnosti, zejména tvrdost, velký modul pružnosti, vysokou pevnost v tlaku, avšak menší pevnost v tahu a jsou značně křehké. [4] Musí být odolné proti vnějším vlivům při výrobě, následné expedici a v konečné fázi při odlévání kovu.

Odolnost proti vzniku trhlin

Je žádoucí, aby jádro udrželo svůj tvar a povrch nebyl nijak porušován vznikem trhlin a jádro bylo odolné vůči otěru taveninou (mělo co nejmenší reakčnost s taveninou). Dutiny vzniklé po odstranění jader není možné ve většině případů dále opracovávat, tudíž je nutno vytvořit povrch jádra o vysoké jakosti.[4]

Porezita

Vlastnost, která je důležitá k docílení správného zatečení taveniny do všech potřebných míst. Plyn, který vzniká při procesu lití, nesmí tavenině zamezovat v zatékání a musí "ventilovat" skrze předem připravené výfuky a materiálem jader. Existují i počítačové simulace, které dokážou navrhnout a vymodelovat co nejlepší odchod plynů při vypalování jader.

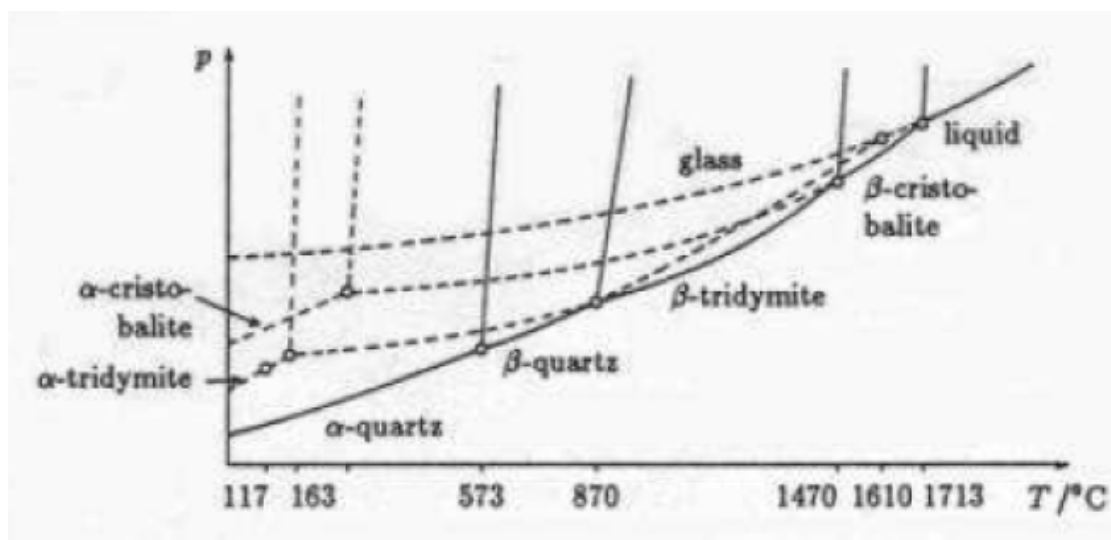
Rozpadavost

Po odlití výrobku je třeba keramické jádro a veškeré zbytky materiálu z odlitku odstranit, proto je zde třeba vysoké rozpadavosti materiálu, jež ulehčuje odstraňování i z těžko přístupných míst. Existuje několik metod odstraňování, např. louhování či mechanické odstraňování.

Každá firma, zabývající se výrobou jader, si přesné materiálové složení a procentuální poměry obsažených složek pečlivě uchovává jako své "know-how". Správné vyvážení směsi je obzvláště důležité pro výchozí použití jader. Toto složení je dosaženo mnohaletým zkoumáním a experimenty. Materiály použité pro keramická jádra musejí poskytovat vysokou kompaktnost pro použití se slitinami, být pevné za tepla, prodyšné a na vysoké úrovni zpracování. I přes výrobní tajemství poskytují výrobci alespoň charakteristické vlastnosti keramických sloučenin, jako např. množství cristobalitu ihned po vytvarování, teplotní roztažnost, pevnost v ohybu, prodyšnost, hustotu apod.

Nejvíce používané keramické materiály jsou na bázi křemičitanů, zvláště pak oxid křemičitý v podobě "fused silica", tzv. křemenné sklo. Tímto materiálem je pak tvořena drtivá většina jader. Jeho rozpustnost ve vodných roztocích, díky nimž nekoroduje odlévaný materiál, je obrovskou výhodou. Za vyšších teplot začíná však měknout a může se prohýbat i pod svou vlastní vahou, např. při použití u tenkostěnných jader. Zde je nutné použití přídatných podpor ve formách. Při vypalování se také využívá přeměny na cristobalit, jenž zpevňuje celou strukturu jádra. Cristobalit je stálý za nízkých a vysokých teplot, avšak mezi 198-240°C prochází fázovou přeměnou v kubický beta-cristobalit. Tato přeměna by mohla jádro rozrušit, např. při ochlazování, proto se neustále zkoumají nejlepší poměry složení SiO_2 a cristobalitu pro výchozí použití jader. [5]

Jako další alternativu lze využít jádra na bázi Al_2O_3 nebo použití se zirkonem. Mezi jeho výhody patří nenáchylnost ke změkčení oproti oxidu křemičitému a jeho větší odolnost vůči agresivním slitinám. Tento oxid ale nemůže být velká konkurence pro oxid křemičitý, jelikož jeho rozpouštění po odlití výrobku je příliš pomalé.



Obr. 4. Graf znázorňující fázové přeměny cristobalitu [6]

Velká rozmanitost křemičitých a křemičito-zirkonových materiálů umožňuje ideální řešení pro odlévání mnoha superslitin použitých v různých průmyslových odvětvích. Firma MTC Certech využívá čtyři stupně křemičitých materiálů pro splnění daných požadavků, ať už pro komponenty ventilů, přes golfové hole až k oběžným kolům čerpadel. Stupně jsou spjaty s odléváním superslitin na bázi monokrystalu (SX – single crystal), slitin s usměrněným tuhnutím (DX – directionally solidified) a odléváním metodou “Equiax” (rovnoosá struktura zrn). [7]

DX – metoda s usměrněným tuhnutím, kde je forma předehřátá nad teplotu tání dané slitiny. Poté, co je forma zcela zahřátá, se slitina lije do formy a ochlazuje řízeným způsobem. Řízením procesu chlazení lze získat v odlitku požadovanou krystalografickou strukturu. V závislosti na drobných odchylkách lze docílit i monokrystalické či sloupovité struktury zrn. Tyto odlitky jsou hojně využívány pro práci ve vysokých teplotách, např. v leteckém průmyslu či u plynových turbín.

SX – metoda určená pro slitiny, jež vytváří při tuhnutí ve formě monokrystalickou strukturu zrn. Dá se k ní dostat pomocí metody DX s jistými odchylkami.

Equiax – metoda odlévání, při níž jsou keramické formy zahřáté na kontrolovanou teplotu. Teplota je mírně pod bodem tuhnutí slitiny a při odlévání do formy se tavenina zchladí a vytváří jednotnou strukturu zrna. [8]



Obr. 5. Lopatka leteckého motoru – rovnoosá struktura, usměrněná krystalizace, monokrystal [9]

Mezi zmiňované čtyři stupně křemičitých materiálů s různými velikostmi částic a určené pro odlišné odvětví patří: [7]

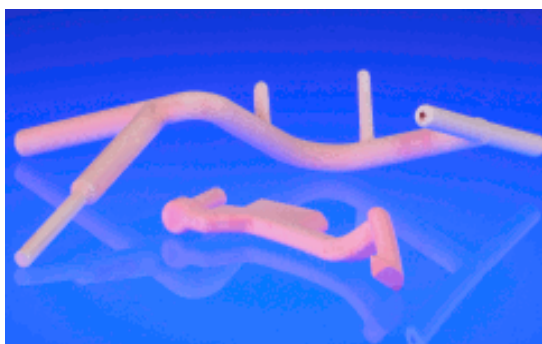
P33 – materiál se středně velkými zrny poskytující vysokou teplotní stabilitu.

Je spjat s využitím u DX a SX aplikací, u nichž jsou znatelné slepé pasáže, kde by mohl být problém s prosakováním jádra.

P77 – materiál s jemnými částicemi, ideální pro aplikaci u odlévání výrobků s malými průřezy.

K120 - křemičito-zirkonové složení se středně velkými zrny, poskytující velkou teplotní stabilitu. Aplikace při výrobě, kde křemičité materiály nejsou pro danou výrobu dostatečné, např. při odlévání metodou “Equiax”.

K278 – křemičito - zirkonové složení materiálu s jemnými částicemi. Využívá se při výrobě tenkých součástí s malými průřezy metodou Equiax, kde je vyžadovaná dobrá teplotní stabilita.



Obr. 6. Jádra vyrobené pomocí materiálu s označením K278 [7]

| Název | P-33 | P-77 | K120 | K278 |
|---|------|------|------|------|
| Chemické složení [%] | | | | |
| SiO ₂ | 96 | 97 | 74 | 74 |
| ZrSiO ₄ | 1,5 | 2 | 24 | 24 |
| Al ₂ O ₃ | 1,5 | 1 | 1 | 1 |
| Množství cristobalitu [%] | | | | |
| Po vypálení | 8 | 6,6 | 8 | 8 |
| Po 30 min (1530°C) | 57 | 61 | 35 | 35 |
| Pevnost v ohybu [MPa] | 13,8 | 16,5 | 17,7 | 13,8 |
| Měrná hustota [g/cm ³] | 1,6 | 1,57 | 1,87 | 1,83 |
| Zdánlivá hustota [g/cm ³] | 2,3 | 2,26 | 2,57 | 2,56 |
| Pórovitost [%] | 30 | 30,3 | 27 | 28 |

Tab. 1. Chemické a mechanické vlastnosti keramických materiálů [7]

3. Vlastnosti a druhy pojiv

Pojiva keramických materiálů musejí splňovat určité požadavky pro danou technologii výrobního procesu přesného lití. Aplikace směsi křemenného skla a pojiva probíhá pod tlakem (vyšším za kratšího časového intervalu a nižším za delšího intervalu). Profily lopatek mají mnoho vnitřních dutin a kanálků, které plnění směsí dosti znesnadňují. Proto zabíhavost patří mezi jednu z nejdůležitějších vlastností. Proces zabíhavosti je spjat s dobrou viskozitou pojiv. Ve většině případů je žádoucí, aby pojivo mělo takovou viskozitu, která umožňuje dostatečný zpětný tlak pro vyplnění dutin. Nízká viskozita pojiva má za následek špatný zpětný tlak a velkou tendenci k nevyplnění matrice. Naopak vysoká viskozita pojiva poskytne dostatek protitlaku, ale není schopna vyplnit mnoho spletitých dutinek uvnitř těla jádra. Mezi další důležité požadavky kladené na vlastnosti pojiv patří kompatibilita s ostatními složkami materiálu jader, stálost během výrobních procesů tzn. bez změn fyzikálních vlastností, zamezení vzniku trhlin důsledkem důkladného promíchání směsi. Při špatném promíchání se mohou vytvářet malé shluky pojiva, které při vypalování vyhoří a utvoří vyhořelé trhlinky na povrchu jádra. Pojiva musejí také snadně vyhořet z vytvrzeného jádra.

Existuje několik druhů pojiv, nejvíce používané jsou však vosky, dále pak termoplastická, tepelně vytvrditelná a pojiva rozpustná ve vodě. [10]

Vosky

Vosky jsou využívány v keramickém modelování už od počátku vzniku metody. Jejich nevýhoda je však nízká teplota tání a velká plasticita. Následkem toho se materiál může roztékat během tvarování, proto se vosky míchají s termoplastickými pojivy, aby se zamezilo určitým nedostatkům. Vosky mají jednu velkou výhodu, že jsou šetrné k nástrojům díky extrémně nízkým tlakům použitých při vstřikování do formy. Nástroje tak vydrží vykonávat pracovní činnost mnohem déle.

Termoplastická pojiva

Jsou pojiva, která při použití netvoří komplexní řetězce, a proto mohou být recyklována, nebo opětovně použita. Poskytují adekvátní viskozitu při plnění, avšak záleží na jejich molekulární hmotnosti. Mají dobrou kompatibilitu s mnoha materiály pro použití s pojivy a při vypalování nezanechávají žádné zbytky. Na druhou stranu jsou citlivé na teplotu a mají tendenci se oddělovat nebo oxidovat při nízkých teplotách. Např. polyetylen-glykol oxiduje při teplotě 80 °C, a to má za následek oddělování částic a tvoření trhlin. Radí se mezi ně pryskyřice a polystyreny.[10]

Tepelně vytvrditelná pojiva – termosety

Při vypalování jader s termosety pojiva nenávratně ztvrdnou. Je to následek propletení polymerních řetězců. Díky danému propletení při zahřátí jsou pojiva velmi pevná, ale velice křehká. Smícháním s ostatními pojivy se vytvrzuje struktura a některá nedokonalá pojiva se mohou tímto způsobem použít v širším rozsahu. Termosetická pojiva se vypalují mnohem hůře. Radí se mezi ně silikonové pryskyřice, epoxidy a polyestery.

Vodou rozpustná pojiva

Obsahují přírodní materiály jako agar a celulózu. Mají nízkou viskozitu a dobrou zabíhavost. Fungují jako protiklad k tepelně vytvrditelným pojivům a používají se při výrobě hliníkových odlitků, které se nemohou louhovat v roztocích hydroxidu sodného či draselného. [10]

Metody vytvrzování používající se od počátku výroby jader jsou postupem času neustále zdokonalovány z hlediska produktivity, technologických vlastností i vlivů na jakost odlitků. Vstřelovací stroje jsou vhodné pro všechny systémy vytvrzování jader.

4. Výroba keramických jader

Keramická jádra musí během odlévání kovů vydržet teploty přesahující 1500°C a do vychladnutí udržet svůj tvar. Odolnost vůči termickému šoku, vysoká teplotní pevnost, nízký koeficient tepelné roztažnosti a dobré rozpouštěcí vlastnosti jsou jedny z důležitých parametrů pro výrobu jader.

Obecně platí, že oxid křemičitý, nebo hlinitý ve formě prášku se smíchá s vhodným pojivem (vosky a parafíny) a aplikuje se za určitého tlaku do formy pomocí injekčního vstřikování. V závislosti na složení materiálu a výchozím použití jader se volí tlaky vstřikování do forem. Po tomto procesu vznikají ve formě tzv. “Green Cores” (syrová jádra), která bývají velmi křehká. Následně, po opatrném vyjmutí ze zápustek formy, se tyto polotovary buď upravují pro zvýšení jejich celkové pevnosti vytvrzováním na určitou teplotu (závisí zde na složení směsi), nebo putují rovnou do pece k vypálení a jádro získává požadovanou pevnost. Existují i jiné metody výroby, jako např. lisování keramického prášku a pojiva za následného tepelného vytvrzení, pokud je metoda vstřikování v nějakých případech nedostačující.

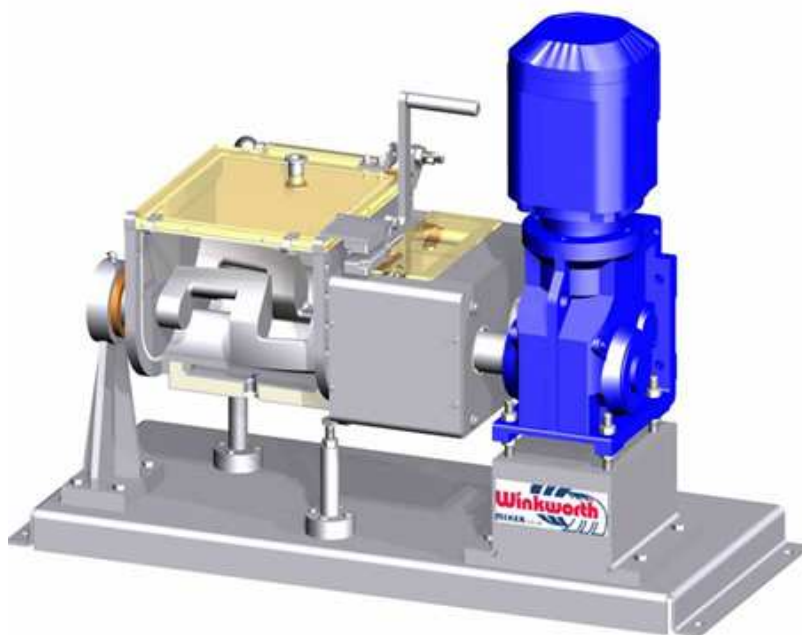
Vzhledem k abrazivním vlastnostem keramické hmoty musí vstřikovací nástroje a trysky být navrženy tak, aby byly schopny vydržet nápor keramického materiálu při procesu. Většinou se využívá tří druhů vstřikování – a) velký tlak, zvýšená teplota a krátký časový interval. Je však nejvíce zatížena na opotřebení trysek a dalších komponent vstřikolisu. Naopak metoda b) za malého tlaku, pokojových teplot a delšího časového intervalu umožňuje strojům pracovat déle. Keramická jádra mají po této metodě lepší mechanické vlastnosti. Třetí metoda c) probíhá za středních tlaků a teplot cca 70°C.

V dnešní době je samozřejmostí numerické modelování jader pomocí sofistikovaných počítačových programů. Jasně se předem určí jejich vlastnosti, rozměry atd. V neposlední řadě se dá naprogramovat a analyzovat i hmotnostní podíl pojiva, tok plynu při vypalování jader či jeho rychlost odvodu z jádra.

4.1 Příprava směsi

Na počátku celého procesu se materiál, ve většině případů oxid křemičitý, v mixerech mísí s pojiv. Celá směs musí být dobře promíchána, aby nedošlo ke vzniku shluků pojiv, které během vytvrzování vytvoří vypálené dutinky a následnou porezitu jádra. Důsledkem těchto kazů se snižuje kvalita jádra a vytváří se také nedostatečná jakost povrchu.

Po důkladném promíchání putuje směs do zásobníků vřikolisů, nebo ostatních strojů na výrobu jader.



Obr. 7. Počítačový model mísiče směsi, firma Winkworth [11]



Obr. 8. Mísič směsi SIGMA MIXER [11]

4.2 Vstřikování směsi

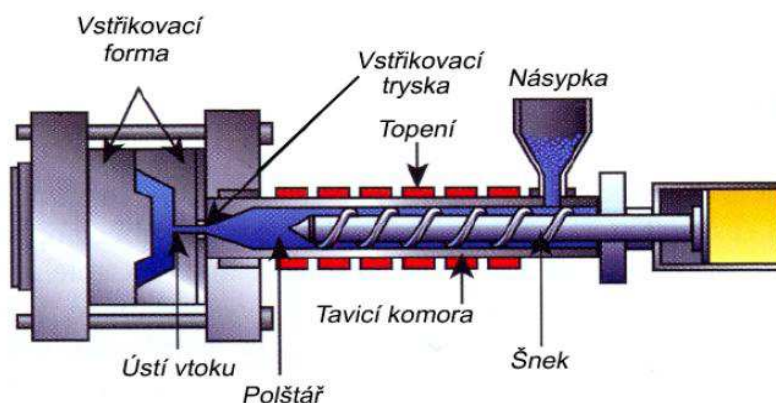
Poté, co je směs pojiva s keramickým práškem důkladně promíchána, putuje do zásobníků formovacích strojů. Samotné vstřikování má několik po sobě jdoucích fází a je podobný procesu vstřikování termoplastů.

Je třeba dbát na správnou životnost nástrojů, jelikož při procesu vstřikování bývají extrémně namáhány trysky. Keramické materiály mají silně abrazivní vlastnosti, a tak zde platí, čím větší tlak vstřikování, tím menší životnost nástroje. Použitím zakalených trysek se docílí delší trvanlivosti.

Postup vstřikování se skládá z následujících fází:

- 1) Umístění promíchané směsi do zásobníku na vstřikovacím stroji.
- 2) Tavení pojiva obsaženého ve směsi pomocí ohřívače.
- 3) Vstřikování rozehřáté směsi pod tlakem do dutin formy, jež se montuje do uzavřené jednotky. Zde hraje důležitou roli viskozita celé směsi, která zajišťuje snadné zatékání do všech dutin formy.
- 4) Chlazení uzavřené formy pomocí chladících kanálků a následné tuhnutí výlisku.
- 5) Po ztuhnutí pojiva ve směsi se upínací jednotka formy otevře a výlisek je vyhazovačem vytlačen ven. Jádru, jež je před vypálením velmi křehké se odstraňuje z formy ručně.

Po procesu vstřikování se provádí vizuální kontrola jádra a následuje počítačová tomografie. Při tomto zkoumání se odhalují nedostatky, jako vnitřní praskliny, nebo zmetky.



Obr. 9. Proces aplikace šnekovým vstřikolisé [12]

4.3 Stroje pro injektáž keramických jader

Keramická jádra lze ve většině případů vyrábět pomocí dvou typů strojů: vstřikolisu a šnekového lisu.

Horizontální šnekový lis

Materiál se zde dopravuje pomocí rotujícího šnekového dopravníku. Teplo vzniklé třecími odpory mezi materiálem, otáčejícím se dopravníkem a válcem má za následek následné zplaztizování pojiva. Šnekový lis má menší tlak na konci stroje proti pístovému lisu. Skládá se z upínací jednotky, vstřikovací jednotky a kontrolního systému. Vstřikovací jednotka obsahuje šnekový dopravník, který zajišťuje pohyb, promíchání, stlačování materiálu uvnitř válce a následné odstraňování bublin. Další částí je tepelná jednotka, která zahřívá směs na požadovanou teplotu a trysky. Tryska řídí vstřikovací proces, během kterého je jádro pod tlakem vyrobeno.



Obr. 10. Horizontální šnekový lis pro výrobu keramických jader [13]

Vstřikolis

Tento typ stroje je využíván ve většině provozů zabývajících se výrobou keramických jader. Existuje několik typů, avšak nejvíce využívané jsou: stroj s rámem ve tvaru "C", který má rozsah upínacích sil od 6 do 100 tun, a typ se čtyřmi pilíři, jehož rozsah je o polovinu větší, a tedy od 6 do 150 tun. [13]



Obr. 11. Vstřikolis se 4 pilíři, firma MAYO ENGINEERING [14]

4.4 Úprava polotovaru a vytvrzování jader

Syrové jádro, také často nazýváno jako Green Core, bývá po vstřikování velmi křehké. Proto se posléze občas provádí úprava tohoto polotovaru k vylepšení jeho mechanických vlastností. Většinou však putuje jádro ve formě polotovaru přímo k vypalování do pece, při němž vyhořívají dočasná pojiva a dochází ke zplyňování a odvodu plynů.

V případech, kdy neputuje polotovar přímo do pece, se jádra před samostatným vypalováním tepelně upravují odstraněním přebytečného pojiva z důvodu velké křehkosti a nízké pevnosti. Úprava probíhá za delšího časového intervalu, až několik hodin, při vyšších teplotách. Během procesu ohřívání polotovarů se v jádru rozkládá organické pojivo, které nesmí zůstat ve shlucích. Kdyby tomu tak zůstalo, mohlo by vést až k roztržení jádra při vypalování v pecích. Jako sekundární efekt při vytvrzování vznikají rizikové plyny (terciární aminy), které potřebují určitou dobu na difuzi k povrchu jádra a musí být vzhledem ke své povaze odsávány a zachyceny. [5]

Vytvrzování [5]

Proces vytvrzování vyžaduje pomalý ohřívací cyklus v intervalu od jednoho až do pěti dní v závislosti na zachování požadované integrity jádra. Použitím materiálů pojiv se širokou škálou molekulových hmotností, například vosky s nízkou viskozitou, lze tento proces urychlit. Pojiva ze silikonových pryskyřic, jako jsou metyl či fenyl-silany jsou tvořeny organickými skupinami a vytváří řetězce. Při zahřátí této směsi na teplotu kolem 500°C se jejich řetězce začínají porušovat a zůstává pouze křemičité sklo jako zbytek. Metyl-silany mohou obsahovat až 80% oxidu křemičitého ve strukturách molekul pryskyřice, fenyl-silany obsahují něco kolem 40% SiO₂. Použitím jedné z těchto pryskyřic nebo jejich kombinací ve formě hmoty s práškem SiO₂, tento oxid křemičitý vázaný v jádru dosáhne totožné vazby pryskyřice. U této směsi není zapotřebí přetavovat polymerizované pojivo k odstranění přebytečných plynů, a tedy může být rovnou vytvrzena. Poté dochází k vypalování jader za vyšších teplot (1100-1400°C). Tento proces může trvat až 12 hodin, záleží na množství požadovaného vzniklého cristobalitu.

Dalším aspektem u použití silikonové pryskyřice jako pojiva je, že jeho vysoká úroveň zbytkového oxidu křemičitého snižuje permeabilitu jádra, když je vosk zcela odstraněn. Tím se zabraňuje rychlému dělení, což znamená, že je třeba tři až pět dní, aby nedošlo k narušení struktury keramiky. Kombinací čistě organických pryskyřic a silikonů mohou být koncentrace oxidu křemičitého upraveny. Také pevnost jádra lze kontrolovat změnou proporcí těchto materiálů. Kupříkladu použitím vosků s nízkou viskozitou lze urychlit celý tento proces vytvrzování jader.

4.5 Vypalování jader

Vypalování jader patří mezi jednu z hlavních operací výroby. Jádra se vypalují po odstranění přebytečného obsahu pojiva při vytvrzování. Proces trvá několik hodin v pecích za teploty přibližně 1200°C. Při procesu vypalování dochází u jader ke zplynování a odvodu plynů z pojiv v pecích. Velmi často zde probíhá také dospalování těchto plynů na povolenou mez.

U křemičito-zirkonových materiálů dochází k poklesu pevností u teplot okolo 1500°C důsledkem obsahu nečistot ve směsi. Naopak materiály na bázi hliníku značně modifikují a pozastavují množství utvářejícího se cristobalitu. Během procesu dochází ke spékání jednotlivých mikrozrn a začínou se tvořit malá množství skelných fází, jež zpevňují celkovou strukturu jádra. I když je jádro po vypálení pevné, vyskytuje se zde velké riziko, co se týče lámavosti a jádro zůstává velice křehké. [5]

4.6 Úprava jader po vypálení

Konečná úprava jader pro výchozí použití probíhá ve fázi dokončování. Metodou se vytváří požadovaný tvar. Po vyformování a následném vypálení jádra, pokud není ještě ve tvaru pro výchozí použití, probíhá jeho abrazivní úprava diamantovým břitkem či úprava pomocí laserového paprsku. S laserovou úpravou lze vytvářet prvky na jádrech menší než 0,5 mm. [15]

Při dokončovacích operacích se na jádru provádí značení, ořezávání, vyztužování, leptání, frézování atd. Při výrobě jader se používá formy, která se skládá ze dvou částí (horní a spodní). Při určité toleranci a opotřebení vzniká mezi těmito dvěma částmi určitá mezera. V této mezeře vzniká tenká slupka vytlačeného materiálu z formy, která musí být pro další použití jádra odstraněna a vyhlazena pomocí dokončovacích operací. Se zmenšujícími se rozměry jádra je obtížnější i jejich mechanická úprava. Při použití miniaturních nástrojů vznikají velké působící síly a hrozí nebezpečí poškození jádra. Použitím nástroje s průměrem menším než 0,5 mm se snižuje při rotaci pevnost jádra a jeho rozměrová stabilita, avšak na druhou stranu při použití laserového paprsku k odstranění otřepů či zbytků tohle nebezpečí nehrozí.[15]

5. Použití jader

Bývaly doby, kdy měli technologové ve slévárnách velké obavy použít keramická jádra vzhledem k nákladnosti výroby, problémům reakčnosti s některými slitinami, vytvrzováním a s tím souvisejícím odplyňováním a v posledním případě také s odstraněním jádra z odlitku. Avšak dnes, postupným vývojem technologií a rozdílným použitím jader, žádné dvě slévárny nejsou totožné. Jádra jsou silně specifikovaná pro výchozí aplikaci a většinou nejsou kompatibilní pro nahrazení podobnými jádry od ostatních výrobců. Každá výroba má své specifikace výrobních postupů, použití daných materiálů a také odlišnou aplikaci při výchozím použití. Na rozdíl od pískových jader, jež si slévárny vyrábějí ve většině případů samy, jsou keramická jádra vyráběná specializovanými firmami z důvodu složitého výrobního procesu.

Keramická jádra se používají při výrobě dutin v odlitcích, kdy jsou ostatní technologie již nepostačující. Jako zaformovaná do voskového modelu jsou součástí procesu při odlévání metodou přesného lití. Po jeho odtavení a následném odlití taveniny do formy mají za úkol vytvořit požadovanou dutinu. Toto použití je velice výhodné pro výrobu tenkých a malých součástí s velmi sofistikovanými vnitřními dutinami, které se využívají například pro chlazení. Jádra se umísťují do forem po výrobu voskového modelu ještě před vstřikováním vosku. Po vytvoření voskového modelu, jeho následném vytavení a odlití taveniny do formy je žádoucí, aby keramické jádro bylo co nejšetrnější cestou odstraněno z odlitku, např. louhováním oproti mechanickému otryskávání, které by mohlo vést k porušení struktury vytvořených dutinek.



Obr. 12. Keramické jádro umístěné do formy před vytvořením voskového modelu [16]



Obr. 13. Keramické jádro uvnitř formy obalené voskovým modelem [16]

Pokročilé keramiky a vysoce výkonné superslitiny hrají důležitou roli při zlepšování leteckých motorů. V leteckém průmyslu se výrobci snaží hledat využití vysokoteplotních materiálů, které zvyšují výkon, snaží zlepšit účinnost paliva za podmínek zachování bezpečnostních norem a současně snížit výrobní náklady. Proto zde mají stěžejní roli pokročilé keramické materiály. Jednou ze základních okolností moderní plynové turbíny motoru je její vysoká vstupní teplota. S teplotami turbíny dosahující až 1300°C (2350°F) a za přítomnosti horkých korozivních plynů jsou součásti leteckých motorů značně namáhány a dochází u nich k erozi a opotřebení. Lopatky turbín odlité ze superslitin niklu nebo na bázi kobaltu s využitím keramických jader pro vytvoření chladících pasáží jsou schopny těmto teplotám odolávat bez jakékoliv kontrakce. Pro dosažení větší efektivity paliva běží motory za vysokých teplot a musí být chlazena více sofistikovanými systémy chlazení, které vyžadují obsazení složitých chladících průchodů. Účinnost plynových turbínových motorů je také do značné míry závislá na teplotě turbíny. Proto zvyšování její teplotní odolnosti je klíčem ke zdokonalování motorů.

Pokročilé keramické materiály s řízenými vlastnostmi umožňují vytvářet speciální chladicí kanálky, které udržují chod motoru před jeho přehřátím. Keramická jádra jsou schopna vytvářet tenké průřezy, udržovat těsné tolerance a jsou dostatečně silná, aby vydržely vstřikovací proces aplikace vosku pomocí metody vytavitelného modelu. [17]

Ke vzniku dostatečně pevných jader se napomáhá pomocí řízeného tuhnutí odlitků směsí zirkonu a oxidu křemičitého. SiO_2 se před samostatným odléváním zahřívá na teplotu cca 1500°C z důvodu částečné přeměny na cristobalit. Jako alternativu lze zvolit směsi s obsahem alkalických kovů a kovů alkalických zemin, jelikož taktéž podporují tvorbu cristobalitu. [18]

6. Odstranění jader z odlitků

Po zhotoveném odlitém výrobku musí být jádro z vnitřních dutin odlitku odstraněno. Existuje několik variant odstraňování jader z odlitku, avšak louhování se zde jeví jako nejvíce vhodné a nejšetrnější k výrobku. Nejčastěji se rozpouštění provádí pomocí alkalických hydroxidů o vhodné koncentraci, kterou se upravuje rychlost a kvalita rozpouštění. Nutno podotknout, že u jader pro hliníkové odlitky nelze použít hydroxidů, z důvodu jejich reakčnosti s nimi. Proto se při jejich výrobě využívá vodou rozpustných pojiv.

Nejvíce vhodným pro louhování jader z odlitků je vodný roztok (cca 20%) hydroxidu sodného, který je zahřátý na teplotu varu. Jako další alternativu lze použít roztok hydroxidu draselného. Hlavními body pro vysokou efektivitu vyluhování je teplota roztoku a udržování jejich stabilní koncentrace. Během postupného rozpouštění keramického jádra se v hlubokých dutinách může vytvářet keramický gel, který zabraňuje průchodu louhu a znesnadňuje rozpouštění. Proto je dobré při rozpouštění s odlitkem pohybovat.

Pro zvýšení efektivity při rozpouštění jader lze použít vyššího tlaku. Pro tuto operaci se používají autoklávy. Tyto přístroje se používají už od konce sedmdesátých let minulého století, kdy se jako alternativa ke křemičitým materiálům na trh začaly dostávat jádra na bázi hlinitanů. Moderní rozpouštěcí autoklávy operují s tlakem přibližně 0,7MPa a představují proces míchání s periodickým uvolňováním tlaku a postupným ohříváním roztoku až do teploty varu. Použitím vyšších tlaků lze použít i vyšších teplot a to vše napomáhá k lepší efektivitě louhování. Například tlak 7MPa umožňuje louhování o teplotě přibližně 250°C a při 10MPa se teplota roztoku v autoklávu pohybuje okolo 350°C. Při této teplotě má roztok dvojnásobný objem. [5]



Obr. 14. Autokláv pro louhování keramických jader, LBBC Technologies [19]

Pro vytváření dutin v hliníkových odlitcích litých pomocí vytavitelného modelu nelze využít klasických metod. Dutiny jsou vytvářeny především použitím vodou vyplavitelných vosků, avšak tento postup je velmi náročný a nedovoluje vytvářet zdaleka tak sofistikované, dlouhé a tenké kanálky. Jádra na bázi fused silica pro oceli a superslitiny nemohou být využívána z důvodu chemické agresivity hydroxidů, které jsou používána při louhování jader. Mechanické odstranění (intenzivním tryskáním) není vhodné použít kvůli hrozícímu porušení povrchu a geometrii odlitků. [20]

7. Chyby jader a jejich deformace

V praxi existuje pár základních rozměrových chyb, které mohou být identifikovány. Sama základní matrice je ve většině případů předmětem problémů, jádro má variabilní smrštění a deformace mohou probíhat zkroucením již při výrobě. Vadná mohou být i umístění známek v zápustce modelu. Všechny tyto aspekty vyžadují značnou dobu zdokonalování jádra a forem. Ve zdokonalování se pokračuje i po odlití první série, to ale může mít za následek prodloužení dodacích lhůt při objednávkách. Proto je zde žádoucí odlévat většinu správně už napoprvé.[5]

Ve chvíli, kdy je jádro ve známkách umístěno dovnitř dutiny formy, musí udržovat přesnou polohu vzhledem k tvarovací stěně po zbytek procesu. Díky neobvyklým fyzikálním vlastnostem SiO_2 , hlavně jeho nízké expanzi, což bylo v prvopočátcích výroby bráno za velkou výhodu, bývá tento postup komplikovaný. Forma jádra, která není tvořena z SiO_2 , má vyšší teplotní roztažnost než samotné jádro a vzdálenost mezi nimi je díky působení tepla odlišná. Proto se jádra i formy předehtřívají v pecích na teplotu asi 1000°C , aby se jádra přizpůsobila teplotním šokům. Oxid křemičitý při vyšší teplotě začíná měknout a začíná být náchylný na působení smykového a kroutícího napětí. K minimalizaci těchto problémů se natírá jeden konec známky jádra lakem, který při odlévání vyhoří a vytvoří kluzný spoj. [5]

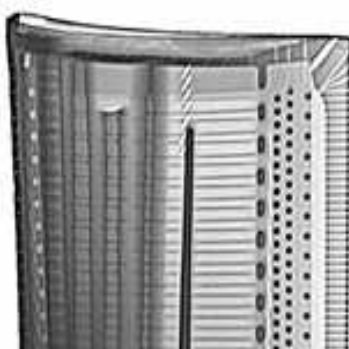


Obr. 15. Kontrolní radiografické zařízení vytvářející digitální snímky [21]

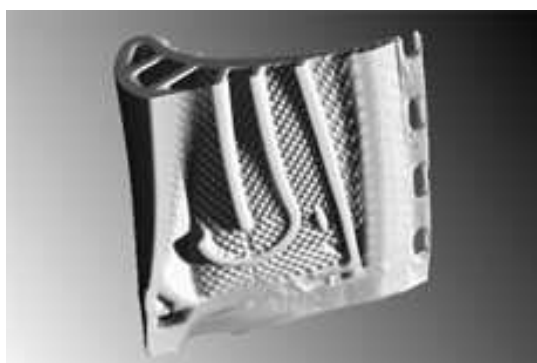
Technika napomáhající k ověření celistvosti keramických jader zahrnuje vizuální kontrolu, měření tolerancí a rentgenové měření. Až do nedávné doby, nebyly žádné elektronické přístroje pro kontrolu vnitřní stavby keramických jader. Aby se docílilo vysoké kvality bez mikroskopických trhlin a defektů, se dnes využívá digitální radiografie k dostatečným kontrolám kvality jader. Přístroj na měření a kontrolu je schopen generovat digitální fotografie pro prohlížení na monitoru počítače. Tyto digitální obrázky lze také elektronicky předávat zákazníkům.[22]

Kupříkladu lopatky turbín patří mezi nejvíce sofistikovaně kontrolované položky vyrobených ve slévárenství. Pomocí moderních rentgenových technologií mohou být splněny velké nároky na kontrolu složitých částí turbín, jako jsou neúplnosti v odlitku či měření tloušťky stěny.

Specifikace jakostí stanovených pro turbínové lopatky a statory jsou velmi náročné. To platí nejen pro použití v leteckém průmyslu, ale stejně tak i pro provoz v elektrárnách. Detekce neúplností vyplývajících z lití, měření tloušťky stěn nebo řízení polohy chladicích otvorů jsou typické úlohy pro rentgenové systémy během výroby. [22]



Obr. 16. Digitální snímek lopatky turbíny znázorněný pomocí filtru HDR [22]



Obr. 17. Lopátka turbíny znázorněná 3D CT tomografií [22]

8. Výchozí použití keramických jader

Keramická jádra nacházejí různorodé uplatnění na půdě slévárenství. Jak již bylo zmíněno dříve v práci, používají se v případech, kdy jsou ostatní výrobní technologie nedostačující. Ve většině případů pro vytvoření chladících kanálků uvnitř lopatek turbín, jak v energetickém, tak v leteckém průmyslu. Dále je možné keramická jádra využít u čerpadel s oběžnými koly, jednotek pro vstřikování směsi ve spalovacích motorech či u komponentů golfových holí nebo v medicínských aparátech, jako např. pro vytvoření dutinek v kolení kloubní náhradě.

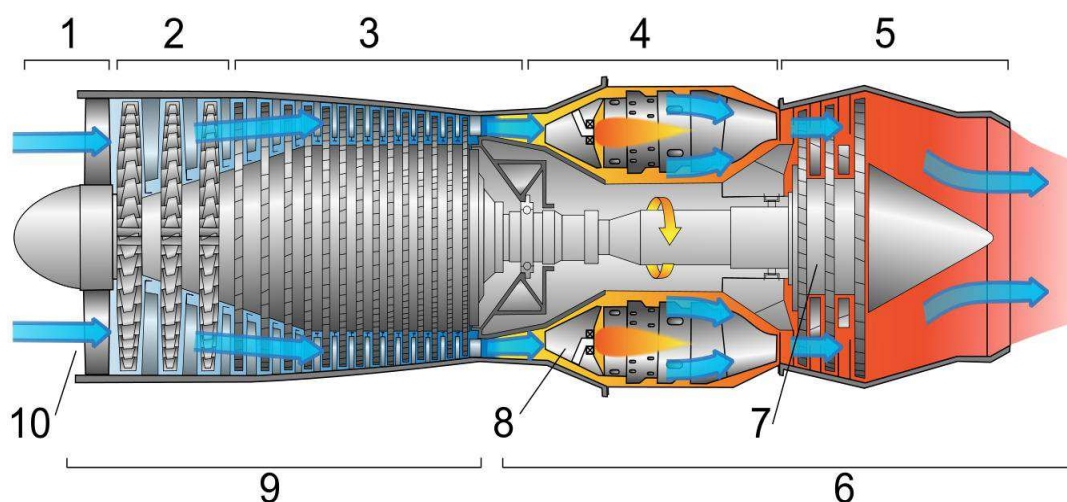
8.1 Plynové turbíny

Plynová, často nazývaná také spalovací turbína je druh spalovacího motoru, u níž se kompresorem stlačený vzduch smíchává s palivem a putuje do spalovací komory. U proudových motorů se jedná o turbokompresor umístěný na společné hřídeli se spalovací turbínou. Spaliny při průchodu turbínou odevzdají jejím lopatkám svou kinetickou energii, která se využívá k tahu u leteckých motorů nebo pro krouťací moment na hřídelích v energetickém průmyslu. V roce 1791 byla poprvé patentována v Anglii Johnem Barberem. [23]

Plynové turbínové motory aplikované v leteckém průmyslu jsou jedny z nejsofistikovanějších součástí k rozvíjení a provozování v daném segmentu. Kvůli rostoucí poptávce po vyšší celkové účinnosti, lepším tahu a lepší ekonomičnosti provozu jsou turbíny provozovány za stále vyšších teplot na vstupu motoru. Tato teplota, dosahující až 1500°C, však často hraničí s teplotou tání materiálu čepele lopatky, jež bývají ze superslitin na bázi niklu. Vyšší teplota pozitivně ovlivňuje efektivitu procesu spalování. Jejich termodynamická a celková účinnost je však při použití jednohřídelového uspořádání velmi nízká, pohybuje se na úrovni 30 až 50% účinnosti vznětových motorů.

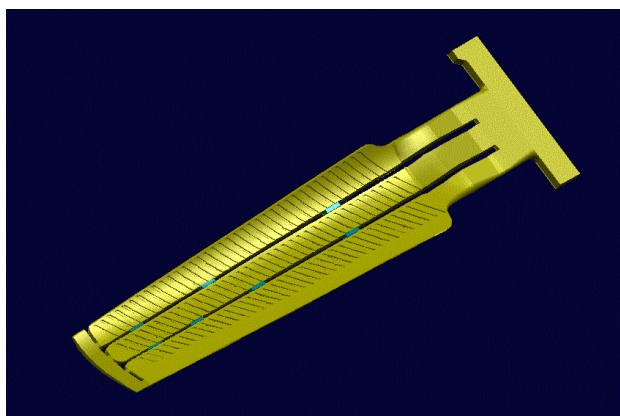


Obr. 18. Turbína leteckého motoru typ PW4000-112, firma PRATT & WHITNEY [24]



Obr. 18. Schéma turbíny,
1 a 2 – Sání, 3 – Komprese, 4 – Spalování, 5 – Výfuk,
6 – Horká sekce, 7 – Turbína, 8 – Spalovací komora, 9 – Studená sekce,
10 – Přívod vzduchu. [25]

Geometrie lopatky turbíny spadá do kategorie tvarových profilů křídla, jež jsou zkroucené od základny do špičky. Relativní natočení po sobě jdoucích profilů, jejich příčné a podélné odchylky, pokud jde o imaginární osy stohování, musí být přesně specifikované a musejí být přísně dodržované již při odlévání metodou vytavitelného modelu. Stejně tak přísná kritéria platí i pro vnitřní dutiny těchto lopatek. [26]



Obr. 19. Geometrický tvar keramického jádra pro nůž turbíny [26]

V případě použití keramických jader je jako chladicí prostředek využíván vzduch, ten je vháněn kompresorem do chladicích kanálků a lopatka je následně ochlazena na teplotu přibližně 1000°C. Tato teplota je vyhovující pro spolehlivý provoz, avšak lehké zvýšení teploty o pár desítek stupňů by mělo za následek zkrácení životnosti turbíny.

Vysoké teploty, kterými jsou lopatky turbín vystavovány, nejsou jediné degradační vlivy. Musejí také odolávat mechanickému opotřebení a oxidacím. Turbíny pracující za vysokých teplot, nasávají vzduch z ovzduší, který obsahuje různé nečistoty jako saze, sopečný popel, zemědělské chemikálie atd. Tyto nečistoty ve spojení s vysokými teplotami silně poškozují povrch lopatek turbín. Proto bývají lopatky vyráběny ze superslitin, jež

mají výbornou odolnost proti vysokoteplotnímu creepu. Superslitiny se skládají většinou na bázi niklu, popřípadě kobaltu, který je však drahý a používaný jen ve výjimečných případech. Jako ochrana proti oxidaci bývají jádra potahována vrstvami hliníku nebo chromu a termální ochranu zastávají povlaky oxidů, např. oxid zirkonu stabilizovaný yttriem. [27]



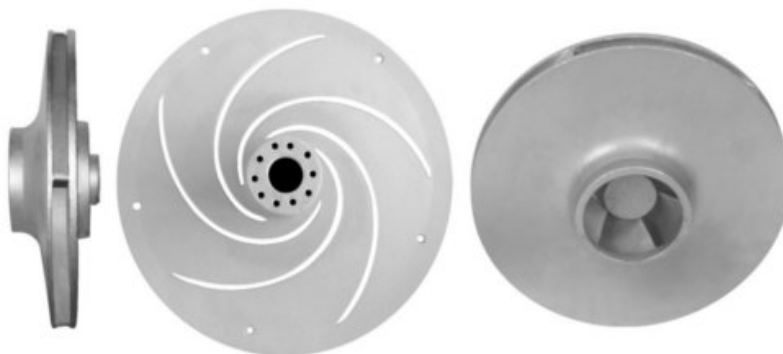
Obr. 20. Teplotně a oxidačně poškozený povrch lopatek turbíny [28]

8.2 Další možné výchozí aplikace keramických jader

Mezi další komponenty, u kterých se při výrobě používají keramická jádra pro vytvoření požadovaného tvaru a velikostí patří:

Keramická jádra pro oběžná kola čerpadel

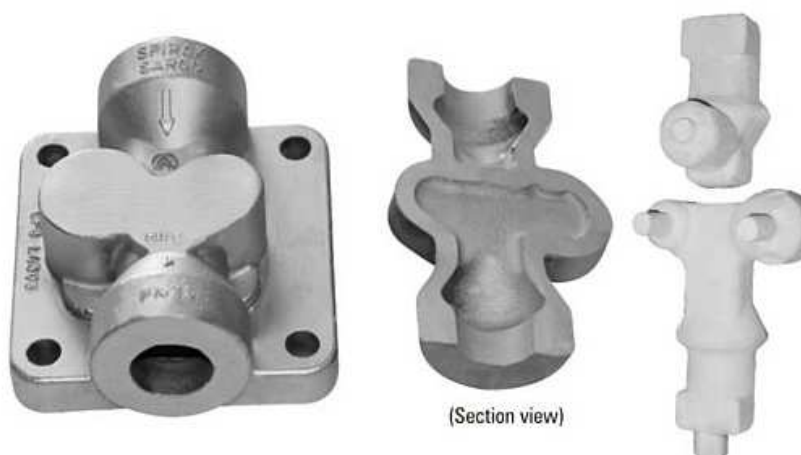
Uzavřená oběžná kola pro čerpadla se vyrábějí z nerezových nebo uhlíkových ocelí pro dlouhou trvanlivost. Pro výrobu jejich vnitřních dutin je nejvýhodnější použití keramických jader.



Obr. 21. Uzavřené oběžné kolo čerpadla [29]

Komponenty pro parní válce

U těchto komponent je třeba docílit vysokou kvalitu vnitřního profilu při použití keramických jader. Při výrobě komponent bývají jádra často povlakována k dosažení povrchu nejvyšší jakosti. U těchto výrobků je žádoucí robustní konstrukce. [29]



Obr. 22. Vnitřní komponenty pro parní válce [29]

Difuzor s vnitřně zkroucenými lopatkami

Tyto difuzory slouží k použití v turbomotorech a jejich vnitřní dutiny se vyrábí pomocí keramických jader. Jejich vnitřní povrch musí mít vysokou kvalitu. [29]



Obr. 23. Difuzor s vnitřně tvarovanými lopatkami [29]

9. Závěr

Úkolem této práce bylo vytvořit literární rešerši na téma moderní trendy využití keramických jader v leteckém a energetickém průmyslu. Teze se především zaměřuje na materiály a pojiva keramických jader, ale také obsahuje jejich samostatnou výrobu a následnou aplikaci v praxi.

I přes svou velikou historii má metoda odlévání pomocí vytavitelného modelu pořád nepostradatelnou úlohu ve většině výrobních procesů týkajících se odlévání. Tato metoda patří mezi velmi přesné, jelikož použitím keramických jader se dosahuje u odlitků vysokých kvalit vnitřních povrchů a ve většině případů se vyrobené odlitky už nijak neupravují.

Výroba keramických jader a jejich následná aplikace k vytvoření vnitřních chladících kanálků uvnitř lopatek turbín má pro dané odvětví výroby stěžejní význam. Postupné vyvíjení nových technologií umožňuje vytvářet sofistikované chlazení, pro účinnější práci plynových turbín při velkých rozdílech teplot. Tyto faktory umožňují efektivnější a ekonomičtější chod součástek.

Seznam použitých zdrojů

- [1] Investment Casting. *Mikro* [online]. © 2009-2011. [cit. 2014-05-08]. Dostupné z:
<http://www.mikrosystems.com/applications/investment-casting>
- [2] Silica Ceramics. *Features and Applications of SiO₂ Ceramics for Metal Casting by Morgan Technical Ceramics* [online]. © 2013. [cit. 2014-05-08]. Dostupné z:
<http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=4545#5>
- [3] HERMAN, A. *Lití na vytavitelný model* [online]. [cit. 2014-05-08]. Dostupné z:
<http://u12133.fsid.cvut.cz/podklady/MPL/presne%20liti%20na%20vytavitelny%20model.pdf>
- [4] PLŠKOVÁ, I. *Fyzikální a technické vlastnosti keramických obkladových prvků*. [online]. [cit. 2014-05-08]. Dostupné z:
<http://www.fce.vutbr.cz/veda/dk2003texty/pdf/4-1/rp/plskova.pdf>
- [5] BEELEY, Peter R. *Investment Casting*. London: The Institute of Materials, 1995, ISBN 09-017-1666-9. [cit. 2014-05-08].
- [6] CAROSI, A, Precicast SA, *Ceramic Materials for Investment Casting Manufacturing Process of Blades for High Efficiency Gas Turbines Engines* [online], 2014, [cit. 2014-05-19]. Dostupné z:
http://www.empa.ch/plugin/template/empa/*/138350/---/l=1
- [7] Morgan Advanced Materials, *Materials* [online]. ©2009. [cit. 2014-05-08]. Dostupné z:
<http://www.mtccertech.com/materials>
- [8] Process Application Capabilities, *Ajax TOCCO Magnethermic Corporation* [online]. © 2005-2011. [cit. 2014-05-08]. Dostupné z:
<http://www.ajaxtocco.com/default.asp?ID=243>
- [9] HORÁČEK, Milan. *Výroba přesných odlitků: Výroba přesných odlitků technologií vytavitelného modelu*. Brno: Odbor slévárenství ÚST, FSI VUT Brno, 2009 [online], [cit. 2011-04-08]. Dostupné z:
<http://ust.fme.vutbr.cz/slevarenstvi/opory.html>
- [10] SINGH, N.-P., NEUBAUER, J. N. What Every Commercial, Aerospace, IGT Investment Caster Needs to Know about Ceramic Cores. *Incast*. 2003, vol. 26, no. 4, p.18-21. ISSN 1045-5779, [cit. 2014-05-08].

- [11] Winkworth MIXER Co. UK, *Laboratory Z mixer / Sigma mixer* [online]. ©2013, [cit. 2014-05-19]. Dostupné z:
<http://www.mixer.co.uk/mixers/detail.aspx?item=laboratory-z-blade-mixer>
- [12] SOBOTKA, J. *Vstřikování plastů*, přednáška TECHNOLOGIE II (tváření kovů a plastů), [online], [cit. 2014-05-08]. Dostupné z:
http://www.techno-mat.cz/data/katedry/ksp/KSP_TKP_PR_10_CZE_Sobotka_Vstrikovani_plastu.pdf
- [13] Molding Machines. *IndiaMART – Indian Manufacturers Suppliers Exporters Directory* [online]. © 2010, [cit. 2014-05-08]. Dostupné z:
<http://trade.indiamart.com/search.mp?search=molding+machines>
- [14] MAYO ENGINEERING. *New Modetech Ceramic Injection Machines*, [online], [cit. 2014-05-19], Dostupné z:
<http://www.mayoengineering.com/new%20model.html>
- [15] MUNTNER, Michael S. ALLIED SIGNAL. *Laser Machining of Ceramic Cores* [patent]. USA. Užitný vzor, US 5465780-1. Uděleno 23. 11. 1993. Dostupné z:
<http://www.directorypatent.com/US/05465780.html>
- [16] Picture Gallery. *Turbine Technologies* [online]. © 2011 [cit. 2014-05-08]. Dostupné z:
http://www.turbinetec.com/Picture_Gallery_01.html
- [17] Morgan Advanced Materials, *Improving Aerospace Engines with Advanced Materials*, [online], 2010-7-13, [cit. 2014-05-08], Dostupné z:
http://www.morgantechnicalceramics.com/resources/technical_articles/improving-aerospace-engines-with-advanced-materials/?page_index=1
- [18] MILLER JR, John J. SHERWOOD REFRACTORIES, Inc. *CORES FOR INVESTMENT CASTING PROCESS* [patent]. USA, Ohio. Užitný vzor, 644,939. Uděleno 1978-6-6. Zapsáno 1975-12-29. [cit. 2014-05-08].
- [19] LBBC TECHNOLOGIES, *Investment casting – Leaching Autoclaves* [online]. [2014]. [cit. 2014-05-08]. Dostupné z:
<http://www.lbbctechnologies.com/investment-casting.aspx>
- [20] TOMEK, L. LÁNÍK, B. SEDLÁČEK, J. VINTER, V. *Vodou vyplavitelná jádra pro lití Al slitin*, Holečkova konference 2013, [cit. 2014-05-08].

- [21] FOUNDRY, *Digital radiography: The newest inspection method to verify integrity of ceramic cores*, [online], 2011-1-21. [cit. 2014-05-08], Dostupné z:
<http://foundrymag.com/feature/digital-radiography-newest-inspection-method-verify-integrity-ceramic-cores>
- [22] XYLON, *Inspecting turbine blades non-destructively*, [online], 2014, [cit. 2014-05-08], Dostupné z:
<http://www.yxlon.com/Applications/Cast-parts/Turbine-blades>
- [23] Massachusetts Institute of Technology, *Early Gas Turbine History* [online], 2013 [cit. 2014-05-08], Dostupné z:
http://web.mit.edu/aeroastro/labs/gtl/early_GT_history.html#patent
- [24] PRATT&WHITNEY, *Commercial engines: PW4000-112 Engine* [online], © 2014, [cit. 2014-05-19], Dostupné z:
http://www.pw.utc.com/PW4000112_Engine
- [25] Fotogalerie, *Turbojet* [online], Wikipedia 2007, Dostupné z:
http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/4c/Jet_engine.svg
- [26] PRADYMUNA, R. BAIG, M. A. H., *Ceramic Cores for Turbine Blades: A Tooling Perspective* [online], [cit. 2014-05-10]. Dostupné z:
http://www.interscience.in/IJMIE_Vol2Iss4/1-7.pdf
- [27] RILEY, Martin. *Towards inert cores for investment casting* [online]. Birmingham, 2011. University of Birmingham. [cit. 2014-05-08]. Dostupné z:
<http://etheses.bham.ac.uk/1503/>
- [28] Fotogalerie, *Sulfidation: Turbine Blade Corrosion* [online], 2008-05-22, [cit. 2014-05-09], Dostupné z:
<http://www.aviationpros.com/article/10378159/sulfidation-turbine-blade-corrosion>
- [29] Indiamart, *Component Cast With Ceramic Core Casting* [online], © 1996-2014, [cit. 2014-05-10], Dostupné z:
<http://www.indiamart.com/amtech-investment-casting/component-cast-with-ceramic-core.html>

Seznam zkratk a cizích pojmů

DX – Directionally Solidfied – metoda odlévání pomocí usměrněné krystalizace

SX – Single Crystal – metoda odlévání na strukturu monokrystalu

Equiax – metoda odlévání na rovnoosou strukturu

Green Cores – syrová jádra

Fused Silica – křemenné sklo